

KOEFISIEN PERPINDAHAN MASSA DAN DIFUSIVITAS EFEKTIF PADA PROSES PENGERINGAN DALAM KOLOM FIXED BED PADA SUHU RENDAH

Harsa Pawignya¹, Hary Sulisty², Supranto²

ABSTRACT

Drying processes for heat reluctant, such as pharmaceutical products (vitamin C), needed special handling, for example a low temperature drying in order to minimize damage.

The principle of drying processes dealt with heat and mass transfer simultaneously so mathematic models can be developed based on the heat and mass balances. These models were solved by numerical method while Kya and De constants can be evaluated with Hooke-Jeeves optimization method.

The experiment of drying processes at the Vitamin C was carried out in a drier set with fixed Bed column at low temperature. The operation variables were Reynolds number, the ratio of bed thickness and column diameter, humidity of air and the ratio of air temperature and solid temperature. Correlation of mass transfer coefisient (Kya) and the axial effective diffusivity (De) with operation variables can be expressed in Sherwood's which is represented by the following emperical equation :

$$Sh = 4.627 \cdot 10^{-3} \cdot Re^{0,9069} (Z/Dt)^{-0,1242} Y^{-0,1614} (Tg/Ts)^{0,5454}$$

with an average error of 1.5%.

Axial effective diffusivity can be represented by the following emperical equation :

$$\left[\frac{De}{Dab} \right] = 8,056 \cdot 10^{-3} Re^{0,2005} (Z/Dt)^{-0,1046} Y^{-0,2323} \cdot (Tg/Ts)^{0,2264}$$

with an average error of 1,6%

These equation are valid for $15,9 \leq Re \leq 26,5$; $1 \leq (Z/Dt) \leq 5$; $2,39 \cdot 10^3 \leq Y \leq 9,83 \cdot 10^3$ and $1,0192 \leq (Tg/Ts) \leq 1,5384$.

Key words : Fixed bed - Drying processes - effective diffusivity - mass trasfer coeficient.

¹ Fakultas Teknologi Industri Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

² Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

1. PENGANTAR

Pada umumnya proses pengeringan merupakan langkah terakhir dari suatu rangkaian operasi didalam suatu sistem pengolahan. Untuk proses pengeringan bahan-bahan yang rentan panas misalnya VitaminC biasanya diperlukan penanganan secara khusus yaitu pengeringan pada suhu rendah. Supaya kerusakan akibat adanya panas dapat ditekan seminimal mungkin. Thorpe (1987) meneliti tentang pengeringan padi dengan menggunakan alat pengering sistim unggun pancar (fluidized bed) diperoleh model keseluruhan kecepatan pengeringan sebanding dengan pangkat eksponensial t_{\max} , dan t_{\max} adalah suhu maximum pengeringan.

Pengeringan menggunakan alat pengering sistim fluidized bed dryer juga telah dicoba dalam pengeringan ketela pohon yang dilakukan pada suhu rendah. Diperoleh bahwa koefisien transfer massa akan naik dengan naiknya kecepatan dan suhu udara pengering dan akan turun dengan semakin besarnya ukuran potongan ketela (Prabowo, 1995). Abid, dkk, (1990), meneliti pengeringan butir-butir jagung menggunakan kolom fluidized bed dalam pengeringan tersebut diperoleh bahwa humidity dan kecepatan udara hanya sedikit berpengaruh terhadap kecepatan pengeringan, sedangkan suhu udara pengaruhnya cukup besar. Pengaruh suhu pengeringan terhadap komposisi kimia fisika dan bahan-bahan yang terkandung dalam tomat telah diteliti oleh Fonseca dan Lu (1976). Diperoleh bahwa dengan kenaikan suhu vitamin C akan menurun, pH dan pektin akan meningkat, sementara warna akan menjadi lebih jelek dan aroma serta rasa akan lebih cepat hilang.

Penyusunan model matematik :

Untuk penyusunan model matematik pada proses pengeringan secara Fixed Bed pada suhu rendah diambil tanggapannya :

(a) Proses pengeringan berlangsung secara adiabatik, (b) butiran terdistribusi merata didalam kolom, (c) aliran udara merata pada permukaan butir dan mengikuti pola aliran sumbat (plug flow), (d) perpindahan massa berlangsung dari padatan ke fluida, (e) suhu dan kadar air dalam suatu butir seragam, (f) gradien suhu dan kadar air ke arah radial diabaikan.

Persamaan model matematik disusun berdasarkan neraca panas dan neraca massa pada elemen volume setebal Δz diperoleh :

$$1. \frac{\partial Y}{\partial z} = \frac{K_y a (Y^* - Y)}{p_s} - \frac{\epsilon p_{ud}}{G} \frac{\partial Y}{\partial t} \quad (1)$$

$$2. De \frac{\partial^2 Y}{\partial z^2} - \frac{K_y a (Y^* - Y)}{p_s} = (1 - \epsilon) \frac{\partial Y}{\partial t} \quad (2)$$

$$3. \frac{\partial T_g}{\partial z} = \frac{h_a}{G C_{pud}} (T_g - T_s) - \frac{\epsilon p_{ud}}{G} \frac{\partial Y}{\partial t} \quad (3)$$

$$4. \frac{\partial T_s}{\partial z} = \frac{h_a}{ps(1-\epsilon)C_{ps}} (T_g - T_s) - \frac{K_{ya} H_{fg}}{ps(1-\epsilon)C_{ps} G} (Y^* - Y) \quad (4)$$

dengan kondisi batas :

$$X(z,0) = X_{in}, \quad X(0,t) = X_o \quad X(z,t) = \text{finite} \quad (5)$$

$$T_s(z,0) = T_{sin} \quad (6)$$

$$Y(z,0) = Y_{in}, \quad Y(0,t) = Y_o, \quad Y(z,t) = \text{finite} \quad (7)$$

$$Y(z,0) = T_{gin}, \quad T_g(0,t) = T_{go}, \quad T_g(z,t) = \text{finite} \quad (8)$$

Persamaan diferensial yang diperoleh diselesaikan secara numerik simultan dengan cara beda hingga sistem implisit dan eksplisit. Harga K_{ya} dan De dapat dicari dengan metode minimasi Hooke-Jeeves.

Untuk menentukan peubah-peubah yang berpengaruh dapat dilakukan analisis dimensi sehingga diperoleh dalam bentuk kelompok tak terdimensi sebagai berikut :

$$\left[\frac{K_{ya} De}{\rho_{ud} D_{ab}} \right] = K_1 \left[\frac{G D_s}{\mu} \right]^{c_1} \left[\frac{Z}{Dt} \right]^{c_2} Y^{c_3} \left[\frac{T_g}{T_s} \right]^{c_4} \quad (9)$$

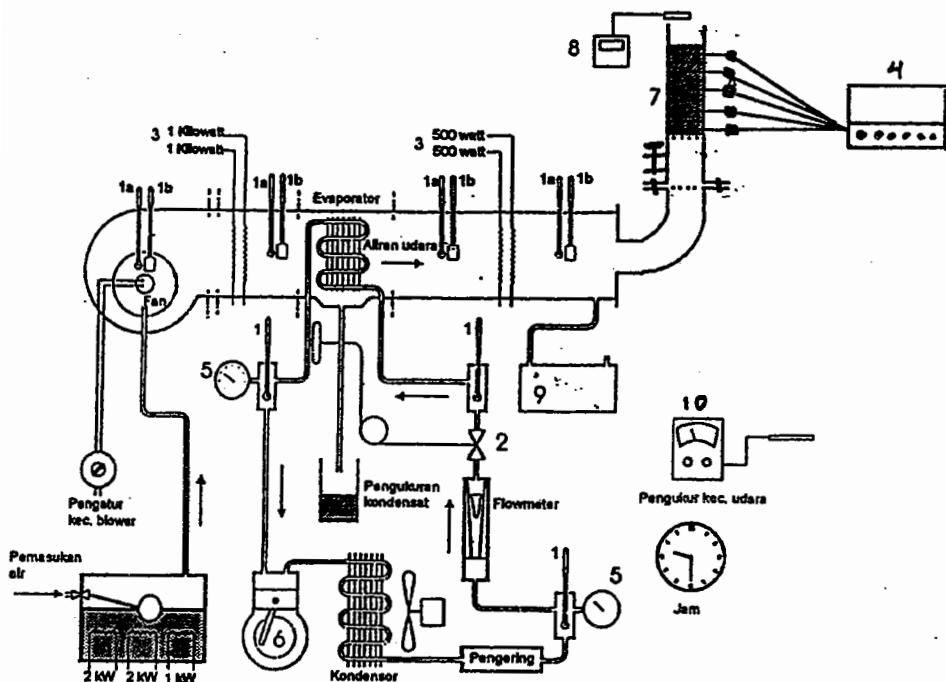
$$\left[\frac{De}{D_{ab}} \right] = K_2 \left[\frac{G D_s}{\mu} \right]^{c_1'} \left[\frac{Z}{Dt} \right]^{c_2'} Y^{c_3'} \left[\frac{T_g}{T_s} \right]^{c_4'} \quad (10)$$

Harga konstanta K_1 , K_2 , c_1 , c_1' , c_2 , c_2' , c_3 , c_3' , c_4 dan c_4' diperoleh dari percobaan dengan variasi harga G , Z/Dt , Y dan T_g/T_s .

2. CARA PENELITIAN

Bahan baku penelitian adalah tablet vitamin C diperoleh dari Apotek Pelita Jl. Deresan Yogyakarta. Setelah dianalisis hasilnya adalah kadar air 9,84%, kadar abu 0,69%, kadar protein 1,20%, kadar lemak 0,75%, kadar vitamin C 29,11% dan kadar karbohidrat 58,5%. Susunan alat dapat dilihat pada Gambar 1, rangkaian alat pengering yang terdiri dari blower, kompresor, pemanas udara dan kolom pengering fixed bed.

Alat :



Keterangan Gambar :

- | | |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1. Termometer. | 5. Pressure gauge |
| a. Termometer kering. | 6. Kompresor |
| b. Termometer basah. | 7. Kolom pengering |
| 2. Thermostatic expansion valve | 8. Pengukur kelembaban udara |
| 3. Pemanas udara | 9. Manometer |
| 4. Termokopel | 10. Pengukur kecepatan udara |

Gambar 1. Rangkaian Alat Proses

Mula-mula menghidupkan AC yang merupakan rangkaian dari blower, kompresor dan pemanas udara yang dilengkapi knop pengatur udara, dengan demikian udara sebelum masuk ke kolom pengering dikondisikan melalui dua tahapan proses yaitu proses pendinginan udara sekaligus dehumidifikasi dan setelah itu proses pemanasan udara yang sudah kering, keadaan ini dibiarkan sampai cukup stabil. Selanjutnya padatan vitamin C dengan ukuran tertentu dimasukkan ke kolom pengering yang diberi penahan maka udara yang sudah dikondisikan akan menerusi unggun melalui sela-sela tumpukan dan akan menguapkan cairannya.

Setelah waktu tertentu sampel ditimbang, diamati suhunya dan diamati kadar air udara masuk dan keluar kolom.

Variabel yang dipelajari meliputi kecepatan udara, perbandingan tinggi bed dengan diameter bed, kadar air udara pengering dan perbandingan suhu udara dengan suhu padatan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

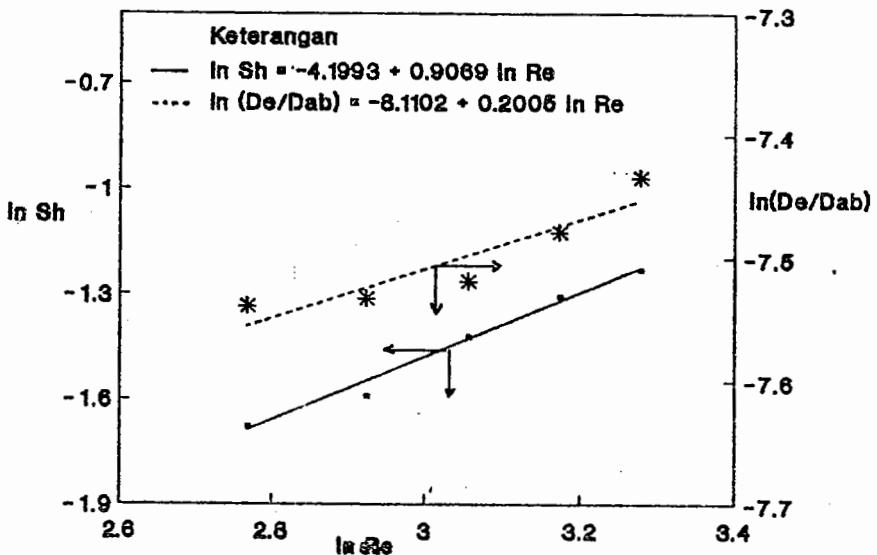
Hasil percobaan dan perhitungan disajikan pada Daftar I sampai Daftar III dan Gambar II dan Gambar III.

Pengaruh kecepatan aliran udara

Pengaruh kecepatan udara terhadap harga $K_y a$ dan De tertera pada Daftar I, kecepatan udara divariasikan sedangkan peubah yang lain dibuat tetap.

Daftar I. Pengaruh kecepatan udara terhadap harga $K_y a$ dan De .
($Z/Dt=3$; $Y=0,00629$; $T_g/T_s = 1,46$)

V m/det	Re	$K_y a \cdot 10^3$ g/det/cm ³	$De \cdot 10^4$ cm ² /det
0,30	15,9	2,953	1,45
0,35	18,9	3,220	1,46
0,40	21,1	3,820	1,48
0,45	23,9	4,276	1,54
0,50	26,5	4,727	1,61



Gambar 2. Pengaruh bilangan Re terhadap $K_y a$ dan De/Dab

Berdasarkan persamaan (9) nilai (Z/Dt) , Y dan (Tg/Ts) tetap maka persamaan (9) dapat diubah menjadi :

$$Sh = L_1 Re^{c1} \quad (11)$$

dimana

$$L_1 = K_1 (Z/Dt)^{c2} Y^{c3} (Tg/Ts)^{c4} \quad (12)$$

Sehingga hubungan antara bilangan Sherwood dengan bilangan Re :

$$Sh = 0,015006 Re^{0,9069} \quad (13)$$

Berdasarkan persamaan (10) dengan nilai (Z/Dt) , Y , (Tg/Ts) tetap persamaan (10) menjadi :

$$\left[\frac{De}{Dab} \right] = L_2 Re^{c1} \quad (14)$$

dimana $L_2 = K_2 (Z/Dt)^{c2'} Y^{c3'} (Tg/Ts)^{c4'}$

Sehingga diperoleh persamaan

$$\left[\frac{De}{Dab} \right] = 3,004 Re^{0,2005} \quad (15)$$

Dari daftar I terlihat bahwa untuk bilangan Re semakin besar maka nilai Kya akan semakin besar, hal ini disebabkan karena semakin tinggi turbulensi fluida maka laju perpindahan massa akan semakin besar. Juga terlihat bahwa semakin besar kecepatan udara maka De akan semakin besar hal ini karena semakin besar kecepatan udara maka penguapan cairan semakin cepat dan perbedaan tekanan antara permukaan cairan dengan udara semakin besar sehingga mempermudah difusi.

Pengaruh Tinggi Tumpukan Padatan

Pengaruh perbandingan tinggi tumpukan padatan dengan diameter kolom terhadap Kya dan De tertera pada Daftar II, tinggi tumpukan padatan divariasikan sedangkan peubah yang lain dibuat tetap.

Dengan menganggap bahwa Re , Y , Tg/Ts tetap maka persamaan (9) menjadi :

$$Sh.Re^{-0,9069} = L_3 (Z/Gt)^{c2} \quad (17)$$

dengan

$$L_3 = K_1 Y^{c3} (Tg/Ts)^{c4} \quad (18)$$

Sehingga diperoleh persamaan :

$$Sh = 0,0165 Re^{0,9069} (Z/Dt)^{-0,1242} \quad (19)$$

Daftar II. Pengaruh perbandingan tinggi tumpukan padatan dengan diameter kolom terhadap Kya dan De. (Re = 26,5 ; Dt = 0,141 cm ; Y = 0,00629 ; Tg/Ts = 1,46).

Z/Dt	Kya.10 ³ g/det/cm ³	De.10 ⁴ cm ² /det
1	4,866	1,74
2	4,741	1,71
3	4,672	1,61
4	4,266	1,53
5	3,600	1,42

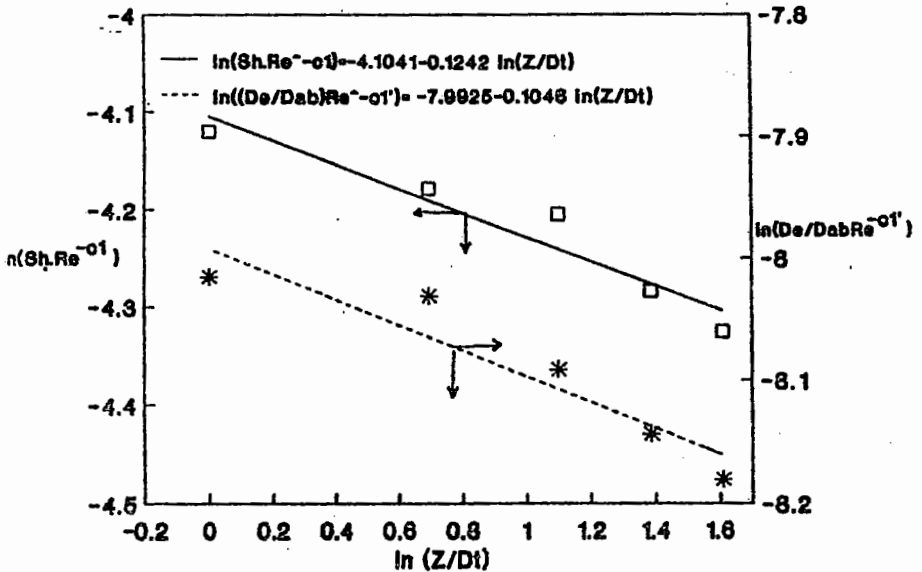
Berdasarkan persamaan (10) dengan harga Re, Y, Tg/Ts tetap maka diperoleh persamaan:

$$\left[\frac{De}{Dab} \right] Re^{-0,2005} = L_4 (Z/Dt)^{c_2} \quad (20)$$

dengan $L_4 = K_2 Y^{c_3'} (Tg/Ts)^{c_4'}$ (21)

Sehingga diperoleh persamaan

$$\left[\frac{De}{Dab} \right] = 3,379.10^4 . Re^{0,2005} \left[\frac{Z}{Dt} \right]^{-0,1046} \quad (22)$$



Gambar 3. Pengaruh (Z/Dt) terhadap Sh dan (De/Dab)

Dari Daftar II terlihat bahwa Z/Dt makin besar maka K_{ya} yang diperoleh akan semakin kecil hal ini karena semakin tebal tumpukan padatan maka perbedaan tekanan uap air antara permukaan padatan dengan udara semakin kecil sehingga akan menurunkan laju perpindahan massa. Juga terlihat bahwa Z/Dt makin besar maka De akan semakin kecil hal ini karena semakin tebal tumpukan padatan dan semakin keatas posisi pada kolom kadar air udara akan bertambah sehingga perbedaan kadar air udara dengan permukaan padatan semakin kecil sehingga akan memperkecil difusi.

Pengaruh Kelembaban Udara (Y) dan Perbandingan (T_g/T_s).

Pengaruh kelembaban udara (Y) dan pengaruh perbandingan (T_g/T_s) dilakukan secara bersama-sama sedang peubah lain dibuat tetap yaitu pada $Re = 26,5$ dan pada $Z/Dt = 3$.

Daftar III. Pengaruh Kelembaban Udara dan Suhu Udara Terhadap K_{ya} dan De . ($Re = 26,5$; $Z/Dt = 3$; $T_s = 26^\circ C$)

No	$Y \cdot 10^3$ g air/g uk	T_g/T_s	$K_{ya} \cdot 10^3$ g/det/cm ³	$De \cdot 10^4$ cm ² /det
1	4,6	1,5384	4,764	1,86
2	6,2	1,4231	4,672	1,69
3	7,3	1,3461	4,392	1,53
4	7,7	1,2307	4,070	1,44
5	9,1	1,1538	4,891	1,37
6	2,39	1,1153	4,709	1,88
7	5,18	1,0769	4,075	1,55
8	7,52	1,0576	3,884	1,41
9	9,12	1,0384	3,664	1,38
10	9,83	1,0192	3,536	1,33

Dengan Re , Z/Dt tetap maka persamaan (9) menjadi :

$$Sh \cdot Re^{c_1} (Z/Dt)^{c_2} = K_1 Y^{c_3} (T_g/T_s)^{c_4} \quad (23)$$

$$\left[\frac{De}{Dab} \right] \cdot Re^{-c_1'} \left[\frac{Z}{Dt} \right]^{-c_2'} = K_2 Y^{c_3'} \left[\frac{T_g}{T_s} \right]^{c_4'} \quad (24)$$

Sehingga diperoleh persamaan :

$$Sh \cdot Re^{-0,9069} (Z/Dt)^{0,1242} = 4,672 \cdot 10^3 Y^{-0,1614} (T_g/T_s)^{0,5454} \quad (25)$$

$$\left[\frac{De}{Dab} \right] \cdot Re^{-0,2005} \left[\frac{Z}{Dt} \right]^{0,1046} = 8,056 \cdot 10^{-5} Y^{-0,2323} \left[\frac{T_g}{T_s} \right]^{0,2264} \quad (26)$$

Sehingga secara keseluruhan pengaruh peubah-peubah yang diteliti terhadap bilangan Sh dan (De/Dab) dapat dituliskan :

$$Sh = 4,672 \cdot 10^{-3} Re^{0,9069} (Z/Dt)^{-0,1242} Y^{-0,1614} (Tg/Ts)^{0,5454} \quad (27)$$

$$\left[\frac{De}{Dab} \right] = 8,056 Re^{0,2005} \left[\frac{Z}{Dt} \right]^{-0,1046} Y^{-0,2323} \left[\frac{Tg}{Ts} \right]^{0,2264} \quad (28)$$

Dari daftar III, terlihat bahwa Y makin bertambah maka Kya akan makin kecil. Hal ini karena perbedaan kadar air udara pengering dengan keadaan jenuhnya semakin kecil maka akan menurunkan laju perpindahan massa dan Y semakin besar diperoleh De akan semakin kecil hal ini karena semakin kering udara yang digunakan maka perbedaan kadar air udara dan padatan semakin besar sehingga mempermudah proses difusi.

Untuk pengaruh (Tg/Ts) terlihat bahwa (Tg/Ts) makin besar maka Kya akan semakin besar hal ini karena perbedaan suhu padatan dengan suhu udara semakin besar sehingga meningkatkan laju perpindahan massa, dan Tg/Ts semakin besar maka De akan bertambah besar, hal ini karena semakin besar perbedaan suhu padatan dengan udara akan mempermudah difusi.

Pengaruh variabel operasi jika dihitung secara regresi serentak:

Bila pengaruh variabel-variabelnya dihitung secara serentak akan diperoleh persamaan ;

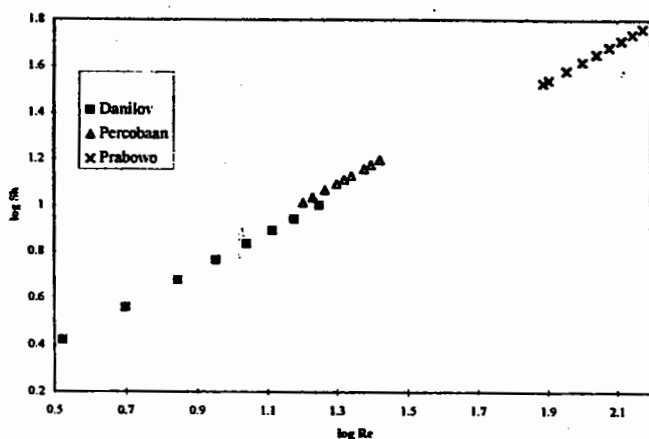
$$Sh = 7,61 \cdot 10^{-3} Re^{0,8408} (Z/Dt)^{-0,1173} Y^{-0,1576} (Tg/Ts)^{0,5259} \quad (29)$$

$$\left[\frac{De}{Dab} \right] = 9,449 \cdot 10^{-5} Re^{0,2005} \left[\frac{Z}{Dt} \right]^{-0,1020} Y^{-0,2324} \left[\frac{Tg}{Ts} \right]^{0,1494} \quad (30)$$

Jika dilihat dari besarnya pangkat pada persamaan (29) dan (30) maka tidak jauh berbeda dengan persamaan yang dihitung secara terpisah yaitu persamaan (27) dan (28).

Pembandingan dengan hasil penelitian lain

Dilihat dari besarnya pangkat dalam persamaan kelompok tak berdimensi, pengaruh yang paling besar adalah bilangan Reynolds sedangkan pengaruh peubah lainnya relatif kecil, maka peristiwa pengeringan ini nilainya bilangan Sherwoods sangat dipengaruhi oleh bilangan Reynolds. Hubungan antara bilangan Reynolds dengan bilangan sherwood pada percobaan pengeringan pernah diteliti diantaranya Prabowo (1995), M. Danillov (1964). Jika hasil penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian para peneliti terdahulu dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh bilangan Re terhadap bilangan Sh.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan :

1. Model matematik yang diajukan dapat mewakili peristiwa pengeringan Vitamin C dalam kolom fixed bed pada suhu rendah
2. Hubungan antara Kya dan De dengan peubah-ubah operasi dinyatakan dalam hubungan antar kelompok tak berdimensi sebagai :

$$Sh = 4,672 \cdot 10^{-3} Re^{0,9069} (Z/Dt)^{-0,1242} Y^{-0,1614} (Tg/Ts)^{0,5454}$$

$$\left[\frac{De}{Dab} \right] = 8,056 \cdot 10^{-5} Re^{0,2005} \left[\frac{Z}{Dt} \right]^{-0,1046} Y^{-0,2323} \left[\frac{Tg}{Ts} \right]^{0,2264}$$

Persamaan tersebut berlaku untuk kisaran $15,9 \leq Re \leq 26,5$; $1 \leq (Z/Dt) \leq 5$; $2,39 \cdot 10^3 \leq Y \leq 9,83 \cdot 10^3$ dan $1,0192 \leq (Tg/Ts) \leq 1,5384$.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penyusun mengucapkan terima kasih kepada Bapak Ir.Rubahman dan Bapak Dr.Ir. Bardi Murachman. SU.DEA yang telah memberikan saran-saran perbaikan dalam seminar penelitian. Juga kepada Bapak Kepala Laboratorium Heat and Mass Transfer PAU Universitas Gadjah Mada beserta seluruh karyawan yang telah membantu terlaksananya penelitian ini.

6. ARTI LAMBANG

c = konstanta

Cps = panas jenis padatan, cal/g pdt/°C.

C _{pu}	= panas jenis udara, cal/g udkr/°C
D _{ab}	= koefisien difusi molekuler, cm ² /det
D _e	= koefisien difusivitas efektif aksial, cm ² /det
G	= kecepatan massa udara, g udkr/cm ² /det.
h _a	= koefisien transfer panas konveksi, cal/cm ³ /det°C.
H _{fg}	= panas penguapan air, cal/g/H ₂ O.
k	= konstanta
K _{ya}	= koefisien perpindahan massa columetris g H ₂ O/det/cm ² /ΔY
L	= konstanta
Re	= bilangan Reynolds
Sh	= bilangan sherwood
t	= waktu pengeringan, detik
T _s	= suhu padatan, °C
T _g	= suhu udara, °C
V	= kecepatan udara, m/detik
X	= kadar air padatan, g H ₂ O/g pdtkr
Y	= Kelembaban udara g H ₂ O/g udkr
Y*	= Kelembaban kesetimbangan udara g H ₂ O/g udkr
Z	= tinggi tumpukan padatan, cm
ρ _s	= densitas bulk padatan, cm.
ρ _{ud}	= densitas udara, g/cm ³
ε	= porositas bed, desimal
μ	= viskositas udara, g/cm/det.

7. DAFTAR PUSTAKA

- Abid, M., Gilbert R, and Laguerie, C., 1990, " Analysis of The Mechanism of Heat and Mass Transfer During The Drying of Corn Grains in Fluidized Bed", A.I. Ch.E. Journal, 30, 632-642
- McCabe and Smith, 1967, "Unit Operation of Chemical Engineering", 2 ed, pp. 939-967, McGraw-Hill Book Co., New York.
- Nirmolo, A., 1994, " Model Matematik dan Fisika Proses Pengeringan Dengan Fixed Bed Grain Dryer", Laporan Penelitian Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta.
- Prabowo. G.C., 1995, "Pengeringan Ketela Pohon Dengan Fluidized Bed Dryer Pada Suhu Rendah", Laporan Penelitian Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta.
- Thorpe. G.R. 1987, "The Thermodynamic Performance of a Continuous flow Fluidized Bed Grain Desinfector and Drier, J. Agric. Eng. Res., 37, 37-41.
- Treybal, T.E, 1981, " Mass Transfer Operations", 3 ed., pp. 655-686, McGraw-Hill Book Co., Tokyo.
- Tyoso B.W., 1987, "Pengeringan", Pusat Fasilitas Bersama Antar Universitas (Bank Dunia XVII) Unit Pelaksana Daerah Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

